

# (d, $^6\text{Li}$ ) 反応による クラスタ相関及び四核子移行反応の研究

著者	梅田 健太郎
号	653
発行年	1980
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/24252">http://hdl.handle.net/10097/24252</a>

氏名・（本籍）	うめ だ けん た ろ う 梅 田 健太郎
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 博 第 658 号
学位授与年月日	昭和55年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻
学位論文題目	( $d, {}^6\text{Li}$ ) 反応による $\alpha$ ラクスター相関及び 四核子移行反応の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 森 田 右 教 授 北 垣 敏 男 助 教 授 藤 平 力

## 論 文 目 次

第1章	序 論
第2章	実験方法
第3章	実験結果
第4章	解析の方法及び解析結果
第5章	議 論
第6章	結 論
	謝 辞
	参考文献
	付 録

# 論文内容要旨

## 第1章 序 論

原子核の基底状態における原子核表面での $\alpha$ クラスターの相関、すなわち、標的核の基底状態と残留核の各状態との間の $\alpha$ クラスターの相関について、実験的に研究するには $(d, {}^6\text{Li})\alpha$ 移行反応が有効な研究手段である。その理由として、 ${}^6\text{Li}$ の基底状態が $d\oplus\alpha$ のクラスターの構造で存在する確率が大きく、 $(d, {}^6\text{Li})$ 反応において移行する四核子が $\alpha$ クラスターの状態で移行すると考えられる点があげられる。これまでも、 $(d, {}^6\text{Li})$ 反応を用い $\alpha$ クラスターの状態の研究が行われてきたが、大多数の測定は、入射エネルギーが35MeV以下で行なわれているため、残留核で測定される状態が低励起状態に限られていた。また、解析においては、DWBA解析に用いる光学パラメーターが様々で、しかも、ZR-DWBA解析のため軽い原子核から重い原子核までの $\alpha$ クラスター分光因子( $\alpha$  cluster spectroscopic factor, 以下 $S\alpha$ )の質量依存性を系統的に求めることは困難であった。

本実験は、残留核において、G.S.を含め高い励起状態までの測定を行い、原子核基底状態における $\alpha$ クラスターの構造の質量依存性、スピン依存性を実験的に明らかにすることを研究の目的とした。そのために、解析においては、系統的な光学ポテンシャルを使用し、recoil effectを正確に考慮したexact-finite range DWBA(以下EFR-DWBA)解析を行ない、また入射エネルギーは従来よりも高い、54.3MeVとした。そして得られた $S\alpha$ の結果は、SU(3)モデル、 $\alpha$  clusterモデルと比較した。

また、従来G.S. $\rightarrow$ G.S.遷移においてのみ比較されていた。 $(d, {}^6\text{Li})$ 反応と $(p, l)$ 反応の対応関係をG.S. $\rightarrow$ excited state 遷移において調べ、さらに $(d, {}^6\text{Li})\alpha$ 移行反応と非弾性散乱との対応関係を調べることで、 $\alpha$ 移行反応における四核子相関と二核子移行反応における二核子相関の関連性について実験的に研究を行なった。

## 第2章 実験方法及び解析方法

実験は大阪大学核物理研究センター(RCNP)のAVFサイクロトロンによって加速された54.3MeVの重陽子ビームを用いて行なった。測定したターゲットは ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{58}\text{Ni}$ ,  ${}^{94}\text{Mo}$ である。反応粒子の測定は $\Delta E-E$  counter telescopeを2セット用いて行ない、 ${}^6\text{Li}$ の粒子識別は大阪電波製の粒子識別回路を用いて行なった。

測定したnatural parity stateの角度分布は、one-step  $\alpha$  pickup反応を仮定し、EFR-DWBAで解析した。使用したコードはDWBA-4である。解析に用いた光学ポテンシャルとして、本実験の運動学的条件に近い条件で求められ、軽い原子核から重い原子核までのターゲットの

弾性散乱を系統的に再現する、重陽子、 ${}^6\text{Li}$ の光学ポテンシャルを使用した。移行する $\alpha$ クラスターの bound state wave function は指定した radial node, 及び $\alpha$ クラスターの結合エネルギーを再現するように Woods-Saxon ポテンシャルの中で求められたものを使用した。有効相互作用としては ${}^6\text{Li}$ の基底状態における $\alpha$ クラスターの bound state wave function を求める時仮定した Woods-Saxon ポテンシャルを用いた。

### 第3章 結果及び議論

#### (i) $S\alpha$ の Target Mass 依存性及び理論との比較

測定された角度分布は one-step  $\alpha$  pickup 反応を仮定した  $EF R-DWBA$  解析で全ターゲットにおいて、全体的に良く再現することができ(例えば図1), 反応過程の不確定性を含まない  $S\alpha$  を求めることができた。図2は解析から求めた  $S\alpha$  の Target Mass 依存性を示す。 ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の解析は,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の基底状態が pure な  $10p-0h$  状態であるとして仮定し,  $S\alpha$  を求めた。図2において double closed shell nuclei である  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の所で  $S\alpha$  が特別大きくなっている。 ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  での特異性を除けば,  $G.S.$ ,  $2^+$ ,  $4^+$ ,  $3^-$ , state の各々の  $S\alpha$  が, Target Mass の増加とともに減少しており, 一般に原子核基底状態における  $\alpha$  クラスターの構造の存在確率は, 原子核の質量が増えるにつれ小さくなることを示している。また, 図2においては, 異なる major shell からの  $\alpha$  pickup で励起される  $3^-$ , state の  $S\alpha$  が同じ major shell からの pickup で励起される  $2^+$ ,  $4^+$ , state の  $S\alpha$  に比べ大きいことが示されている。この事は,  $\alpha$  クラスターの構成に関与する核子が異なる major shell に存在していても, その  $S\alpha$  は同じ major shell に存在する核子により形成される  $\alpha$  クラスターの  $S\alpha$  に比べ決して小さくないことを意味している。この点は  $SU(3)$  モデルにより理論的に指摘されている。図3に  $SU(3)$  モデル,  $\alpha$  クラスターモデルにより与えられる  $G.S. \rightarrow G.S.$  遷移における  $S\alpha^{G.S.}$  を白丸で示す。理論は  $S\alpha^{G.S.}$  が  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の所で特別大きくなることを示さず, Target Mass の増加とともに減少していくことを与えている。また,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の各ターゲットにおいて求められた  $S\alpha$  を各々の残留核の  $S\alpha^{G.S.}$  で規格化した  $S\alpha/S\alpha^{G.S.}$  の値を, 理論と実験と比較してみると,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$  は理論と実験が良く一致するが,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  では両者の一致は良くない。そこで,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  における実験と理論とのずれが,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の基底状態の波動関数をもっと正確に考慮することにより改善されるか調べてみた。

${}^{16}\text{O}$  には Brown and Green,  ${}^{40}\text{Ca}$  には Gerace and Green の波動関数を用いた。図1を見ると,  ${}^{16}\text{O}(d, {}^6\text{Li}) {}^{12}\text{C}(2_1^+)$  の角度分布の形状が  $12p-2h$ ,  $14p-4h$  を考慮した計算を行なうことにより, pure な  $10p-0h$  を仮定した  $DWBA$  解析よりも改善されることがわかる。図3の  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  の所に示す, 値の小さい方の黒丸が  $12p-2h$ ,  $14p-4h$  の成分を考慮した  $DWBA$  解析から求めた  $S\alpha^{G.S.}$  である。pure な  $10p-0h$  を仮定した計算により求めた

$S\alpha^{G.S.}$  に比べ約  $\frac{1}{8}$  の値となっている。 $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  の  $S\alpha^{G.S.}$  として,  $|2p-2h\rangle$ ,  $|4p-4h\rangle$  の成分を考慮して求めた  $S\alpha^{G.S.}$  が Target Mass の増加とともに減少する傾向を与え, 理論 (白丸) の傾向と一致する傾向を得ることができる。ただし, 実験結果は理論に比べてゆっくりと  $S\alpha^{G.S.}$  が小さくなっている。

図4に,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応における各 spin state の微分断面積の Target Mass 依存性を示す。一般にどの spin state とも, Target Mass の増加とともに微分断面積が減少している。この傾向は図2における  $S\alpha$  の Target Mass 依存性によく対応している。特に,  $G.S. \rightarrow G.S.$  遷移断面積が示す傾向と, 図3の  $S\alpha^{G.S.}$  (黒丸) (但し,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  の  $S\alpha^{G.S.}$  として,  $|2p-2h\rangle$ ,  $|4p-4h\rangle$  成分を考慮して求めた  $S\alpha^{G.S.}$  を採用) の示す Target Mass 依存性の傾向は変化の傾きを含め良く対応している。このように,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応における微分断面積の Target Mass 依存性は, 原子核基盤状態における  $\alpha$  クラスターの構造の存在確率の質量依存性を直接的に反映していることを図2, 3, 4の比較から, 示すことができた。

(ii)  $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$ ,  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$  反応の  $(p, t)$  反応, 及び非弾性散乱との類似性

$S_n$  isotope をターゲットとした  $S_n(d, {}^6\text{Li})$ ,  $S_n(p, t)$  反応における基底状態間遷移の断面積の neutron 数依存性は両反応で非常に類似した傾向を示し,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応と  $(p, t)$  反応が関連しあっていることが報告されている。そして, この対応関係は, 遷移強度の neutron 数依存性が移行する neutron pair によって与えられ,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応において移行する proton pair はこの依存性に対し, spectator 的な振舞をしていることを示している。本実験では  $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$ ,  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$  反応において  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  の proton state が励起される際の  $(d, {}^6\text{Li})$  反応において移行する neutron pair の spectator 的な振舞を  $(p, t)$  反応と比較することにより研究した。その結果,  $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})^{54}\text{Fe}$  [ $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})^{90}\text{Zr}$ ] 反応において励起される proton state の断面積の相対値は移行する proton pair の性質により強く支配され, これらの proton state の励起の相対強度に対し移行する neutron pair は spectator 的な振舞をしていることが, 二核子移行反応である  $^{48}\text{Ca}(p, t)^{46}\text{Ca}$  [ $^{74}\text{Ge}(p, t)^{72}\text{Ge}$ ] 反応との対応関係により示すことができた。図5は  $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$  反応と  $^{48}\text{Ca}(p, t)$  反応における  $G.S.$ ,  $2_1^+$ ,  $4_1^+$  state の励起され方を比較したものである。 $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$  反応では  $[\pi(f_{7/2})_{L=0,2,4}^2 \nu(p_{3/2})_{L=0}^{L=0,2,4}]$  の粒子が移行し,  $^{48}\text{Ca}(p, t)$  反応では  $[\nu(f_{7/2})^2]_{L=0,2,4}^{L=0,2,4}$  の粒子が移行することによりこれらの state が励起される。両反応が, 極めて類似した, 断面積の相対値を示しており, この断面積の相対値が  $[(f_{7/2})]_{L=0,2,4}^{L=0,2,4}$  の nucleon pair により支配され,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応で移行する  $(p_{3/2})^2$  の neutron pair この断面積の相対値に対し spectator 的な振舞をしていることがわかる。

二核子移行反応と非弾性散乱の類似性が実験的, 理論的に言われてきた。Brogia et al. は二核子移行反応における spectroscopic factor が非弾性散乱における多重極演算子の換算行列

要素で書き表わされることにより両反応が類似性を持つことを示した。そこで、本実験では、 $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$ ,  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$  反応の excited state の励起のされ方が二核子移行反応と良い対応がつく時、 $^{54}\text{Fe}(\alpha, \alpha')$ ,  $^{90}\text{Zr}(\alpha, \alpha')$  の非弾性散乱による各 state の励起のされ方と対応関係が存在するか調べてみた。図 6 は  $^{54}\text{Fe}(\alpha, \alpha')$  反応と  $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$   $^{54}\text{Fe}$  反応における各 state の励起のされ方を比較したものである。図 7 は同様に  $^{90}\text{Zr}(\alpha, \alpha')$  反応と  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$   $^{90}\text{Zr}$  反応を比較したものである。図 6, 7 とも、非弾性散乱,  $(d, {}^6\text{Li})$  反応の両反応の各 state の励起の仕方(強弱)は良く対応し、 $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$ ,  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$  反応が非弾性散乱と類似性を持つことが実験的に示された。

本論文では、 $(d, {}^6\text{Li})$   $\alpha$  移行反応が二核子移行反応及び非弾性散乱と類似性を持つことは、 $\alpha$  cluster spectroscopic amplitude が  $\alpha$  クラスターを構成する 2 proton の structure factor と 2 neutron の structure factor の積の coherent な和で与えられるという Kurath and Towner の理論により定性的に理解できることを議論した。 $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  の原子核で上述した類似性が存在することを実験的に明らかにすることによりこれらの原子核で Kurath and Towner の理論が定性的に成立していることを、実験的に検証することができた。

#### 第 4 章 結 論

$(d, {}^6\text{Li})$   $\alpha$  pickup 反応により、 $\alpha$  cluster spectroscopic factor  $S\alpha$  を求め、原子核基底状態における、標的核の基底状態と残留核の各状態との間の  $\alpha$  クラスター相関を調べた。その結果、 $12 \leq A \leq 94$  の範囲では Target Mass が増えるにしたがい、 $\alpha$  クラスターの構造の存在確率が小さくなることが実験に示すことができた。 $S\alpha^{\text{G.S.}}$  は理論、実験とも、Target Mass の増加とともに減少するが、実験値は理論に比べて、ゆるやかに減少することが両者の比較からわかった。

また、 $N >$  を核である  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Mo}$  を標的とした  $(d, {}^6\text{Li})$  反応での  $\text{G.S.} \rightarrow \text{excited state}$  遷移において、 $(d, {}^6\text{Li})$  反応と  $(p, t)$  反応及び非弾性散乱とが類似した特徴を持つことを実験的に明確に検証することができた。また、実験的に観測された  $\alpha$  移行反応と二核子移行反応、及び非弾性散乱との類似性は、移行する  $\alpha$  クラスターの  $\alpha$  cluster spectroscopic amplitude が  $\alpha$  を形成する 2 proton の structure factor と 2 neutron の structure factor の積で近似的に書かれるという Kurath and Towner の理論で定性的に理解できることを指摘した。

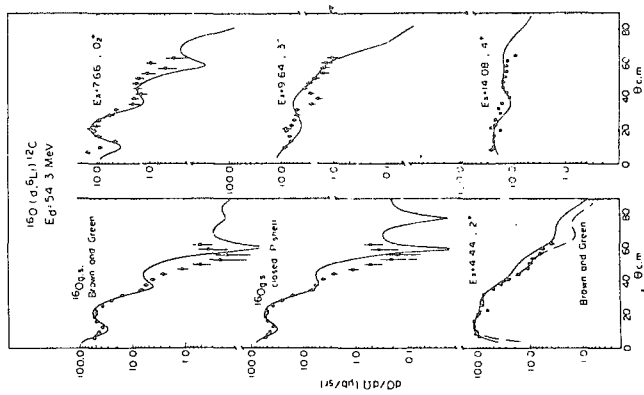


図 1

$^{16}\text{O}(d, ^6\text{Li})^{12}\text{C}$  反応の角度分布と  
*EF R-DW B A* 解析の計算結果

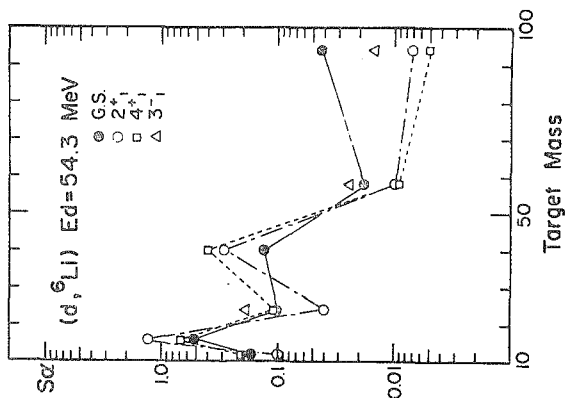


図 2

*EF R-DW B A* 解析から求まった  
 $S\alpha$  の Target Mass 依存性

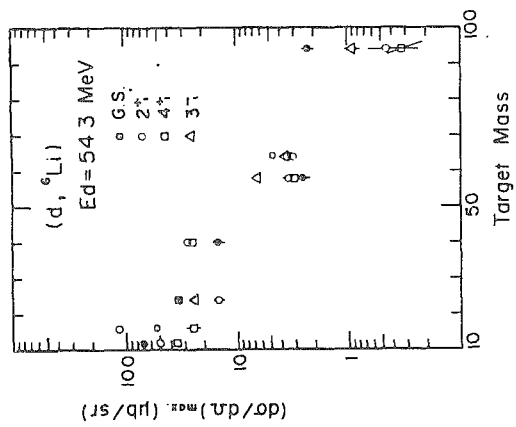


図 4

( $d, {}^6\text{Li}$ ) 反応における微分断面積  
の Target Mass 依存性

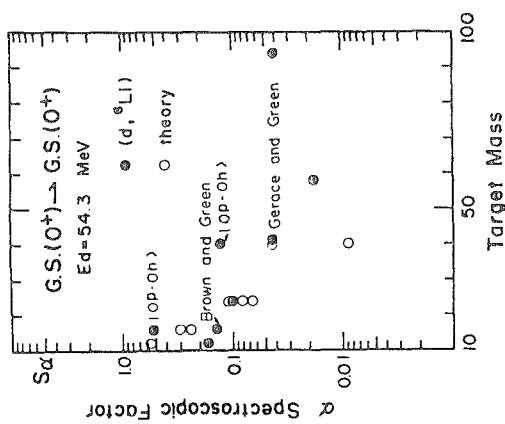


図 8

$S\alpha^{G.S.}$  の Target Mass 依存性  
白丸は理論値, 黒丸は( $d, {}^6\text{Li}$ )  
反応から求めた実験値を示す。



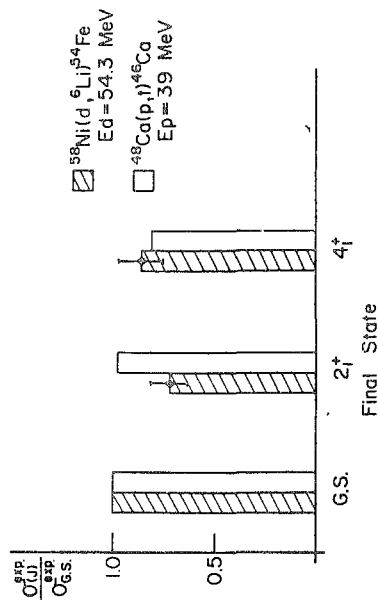


図 5

$^{58}\text{Ni}(d, ^6\text{Li})^{54}\text{Fe}$  反応と  $^{48}\text{Ca}(p, t)^{46}\text{Ca}$  反応における G.S.,  $2^+$ ,  $4^+$  遷移断面積の比較。  
 $\sigma^{\text{exp}}$  は angle integrated cross section を示す。

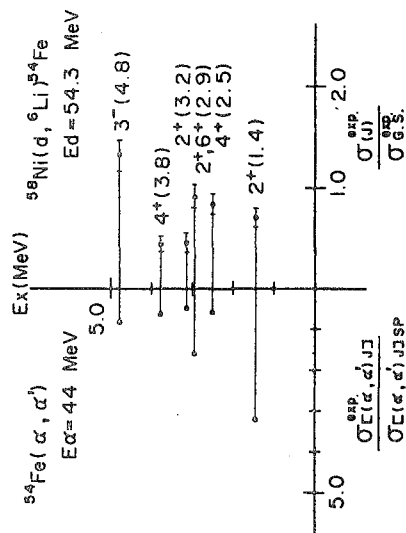
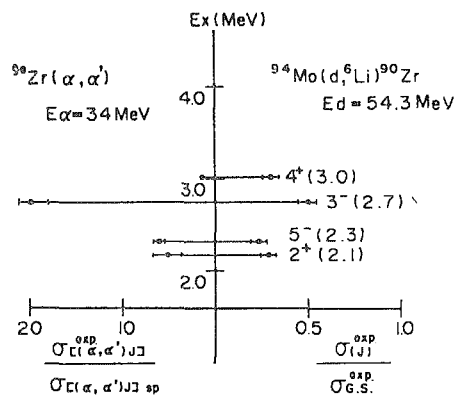


図 6

$^{58}\text{Ni}(d, ^6\text{Li})^{54}\text{Fe}$  反応と  $^{54}\text{Fe}(\alpha, \alpha')$  反応における断面積の比較。  
 $\sigma^{\text{exp}}$  は angle integrated cross section を示し,  $\sigma_{\text{s.p}}$  は実験値を Weisskopf unit で割った enhancement G-factor を示す。



7 図

$^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})^{90}\text{Zr}(\alpha, \alpha')$  反応における  
断面積の比較,  $\sigma^{\text{exp}}, \frac{\sigma^{\text{exp}}}{\sigma_{\text{sp}}}$  については, 図 6  
の説明を参照。

## 論文審査の結果の要旨

本論文はまず、大阪大学核物理研究センターのサイクロトロンからの 54.3 MeV 重陽子ビームで  $^{12}\text{C}$ – $^{94}\text{Mo}$  までの 6 種のターゲットを衝撃し、 $(d, {}^6\text{Li})$  反応すなわち  $\alpha$  ピックアップ反応で放出される  ${}^6\text{Li}$  核の角分布を測定した。測定器は、カウンターテレスコープと粒子識別回路を用いた。

次いで、得られた角分布を exact-finite range DWBA 計算によって解析し、全体的に実験結果をよく再現することができ、 $\alpha$  クラスターの分光学因子を求めた。そしてこの分光学因子のターゲット質量依存性を調べた。

一般に質量の増加と共に減少し、基底状態間遷移に対する分光学因子は、SU(3)理論および  $\alpha$  クラスター模型からの計算値と大体一致するが、 $^{16}\text{O}$  と  $^{40}\text{Ca}$  の 2 重閉殻の核では異常に大きい値を示す。それで基底状態に、励起状態配位の混合を考慮して DWBA 解析をやり直した結果、この 2 つの核種での理論との不一致を改善することができた。また基底状態間遷移の微分断面積のターゲット質量依存性は、 $\alpha$  クラスター分光学因子の依存性を非常によく似たふるまいを示すことを指摘した。

今まで、 $(d, {}^6\text{Li})$  反応と  $(p, t)$  反応の基底状態間の遷移強度の中性子数依存性は、移行する中性子対によって支配され、 $(d, {}^6\text{Li})$  反応で移行する陽子対はスペクテーターとしてふるまっていることが報告されている。それで著者は、 $^{58}\text{Ni}(d, {}^6\text{Li})$  および  $^{94}\text{Mo}(d, {}^6\text{Li})$  反応で、生成核の陽子状態が励起される際の中性子対の役割をしらべるために  $(p, t)$  反応の場合の断面積の相対値と比べることによって、陽子状態の励起に際しては移行する中性子対はスペクテーターとしてふるまうことが見出された。またこの 2 つの反応を、 $\alpha$  粒子の非弾性散乱の実験結果と比べ、各対応する励起状態間遷移に、顕著な類似性があることを見出した。

このように  $(d, {}^6\text{Li})$  による  $\alpha$  粒子移行反応と、2 核子移行反応、非弾性散乱との類似性から、 $\alpha$  クラスター分光学因子に関する Kurath-Towner の理論を定性的に証明することができた。

本論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示しており、よって梅田健太郎提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。